

S-210JA-29 号機による電離層プラズマの観測結果

宮崎 茂*・森 弘隆*・小川忠彦*

Results of Polar Ionospheric Plasma Observation by the Rocket S-210JA-29

Shigeru MIYAZAKI*, Hirotaka MORI* and Tadahiko OGAWA*

Abstract: In order to measure the electron density and density irregularities in the polar ionosphere sounding rocket S-210JA-29 was fired at 19h15m (LT) on July 12, 1977 from Syowa Station, Antarctica. The observational results show that there exists an E_s layer in the altitude region between 85 km and 115 km, and its electron density is $2-4 \times 10^4/\text{cm}^3$, and the electron density above 115 km is decreasing. The values of the measured electron density profile are rather low compared with the nighttime electron density profiles which were observed until now.

The profiles of the electrostatic noise spectrum show remarkable changes against the altitude. The amplitudes of spectrum of the electrostatic noise become great in the region between 95 km and 106 km in the ascending time and between 103 km and 112 km in the descending time. The amplitudes of spectrum have a peak value at 1-2 kHz and the spectrum spreads out to the higher frequency region. Assuming that the observed spectrum of the electrostatic noise to be a natural one, these irregularities seem to be caused partly by a two-stream plasma instability mechanism.

要旨: S-210JA-29号機は第18次南極地域観測隊によって、1977年7月12日19時15分(LT)に発射された。電子密度高度分布は85-115 kmの E_s 層の存在を示し、その密度は $2-4 \times 10^4/\text{cm}^3$ である。 D 領域(70 km以下)のenhancementはなく、また115 km以上の高さでは、密度の著しい単調減少を示している。このプロファイルは、今までの夜間の測定結果と比較すると、かなり低い密度を示していることが注目される。この時のリオメータ、イオノグラムおよびマグネトグラムの記録は静穏であることを示している。

また観測された静電ノイズのスペクトルは、高度に対してきわめて著しい変化を示している。上昇時高度95-106 km、下降時103-112 kmにおいて、ゆらぎの振幅が大きくなり、1-2 kHzにピークをもち、スペクトルは高周波側へ伸びているのが観測された。今回観測されたノイズが自然のものであるとすると、スペクトルの数kHz帯の成分は、2流体プラズマ不安定性によるイオン波の可能性を示唆する。

* 郵政省電波研究所. Radio Research Laboratories, 2-1, Nukuikita-machi 4-chome, Koganei-shi, Tokyo 184.

1. 緒 言

極域電離層生成の電離源として、太陽遠紫外線のほかに磁気圏からの荷電粒子が重要である。静穏時においても、荷電粒子降下による影響が存在し、特に E 領域および D 領域に著しい効果を及ぼす。これは中低緯度の電離層と比較して、大きな違いである。したがって極域電離層の日変化特性、季節変化特性は複雑である。種々の度合のじょう乱時において、電離層電子密度高度分布のロケット観測による結果と地上観測とを合わせて、極域電離層の電離機構、電離層のじょう乱時の特性および日変化特性を解明することが、目的の1つである。

特にサブストーム時には高エネルギー粒子の役割が重要になり、オーロラを励起すると共に下部電離層の電子密度・温度を上昇せしめる。さらに電離層に強い電場がじゃっ起される結果、 E 領域の電子密度は時間的空間的に変動し微細構造が生ずる。これらの現象をロケットを用いて直接測定を行い、極域電離層のプラズマじょう乱の微細構造、および発生機構を調べることによって、オーロラフレア現象の解明に寄与する。

2. 電子密度観測結果

第18次南極地域観測隊によって S-210JA-29 号機は1977年7月12日19時15分 (LT) に発射され、最高高度 118 km に達した。ロケット飛しょう時においては、イオノグラムでは E_S が出たり消えたりの状態、30 MHz のリオメータの吸収の変化値は 0 dB (Ose *et al.*, 1978),

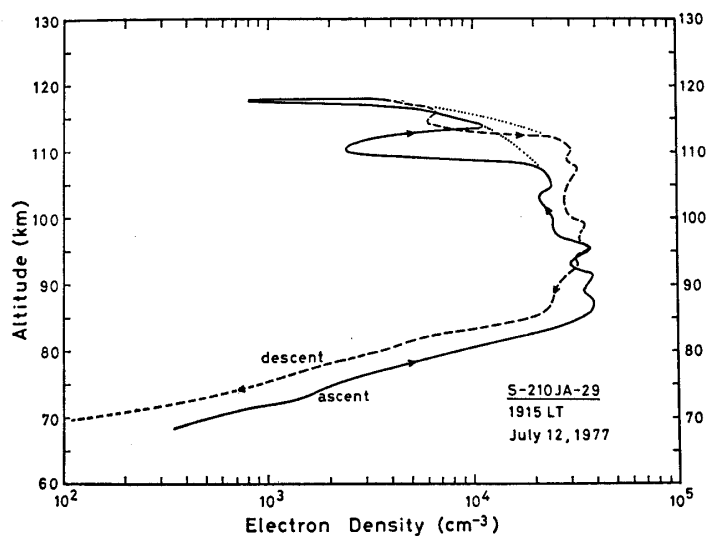


図 1 S-210JA-29 による電子密度高度分布

Fig. 1. Electron density profiles by S-210JA-29 rocket.

地磁気 ΔH の変化は 0γ , 弱い VLF エミッションが存在した状況で, 総体的には静穏である. 電子密度の観測は, ロケット先端近くのファラデーカップのグリッドに流れる電子電流から求めた. 高度 65–118 km の間のプロファイルが得られた. 図 1 は S-210JA-29 号機による観測結果を示す. 85–115 km の間において $2\text{--}4 \times 10^4/\text{cm}^3$ の密度の E_s 層が測定され, E_s 層の厚さは約 20 km であることがわかる. 上昇時の約 108 km から 113 km の間, 同じく上昇時約 116 km から 118 km の間, および下降時約 116 km から 112 km の間の密度の減少は, ロケットの姿勢によるものと推定される. 飛しょう時間に対する電子密度の観測結果を, ロ

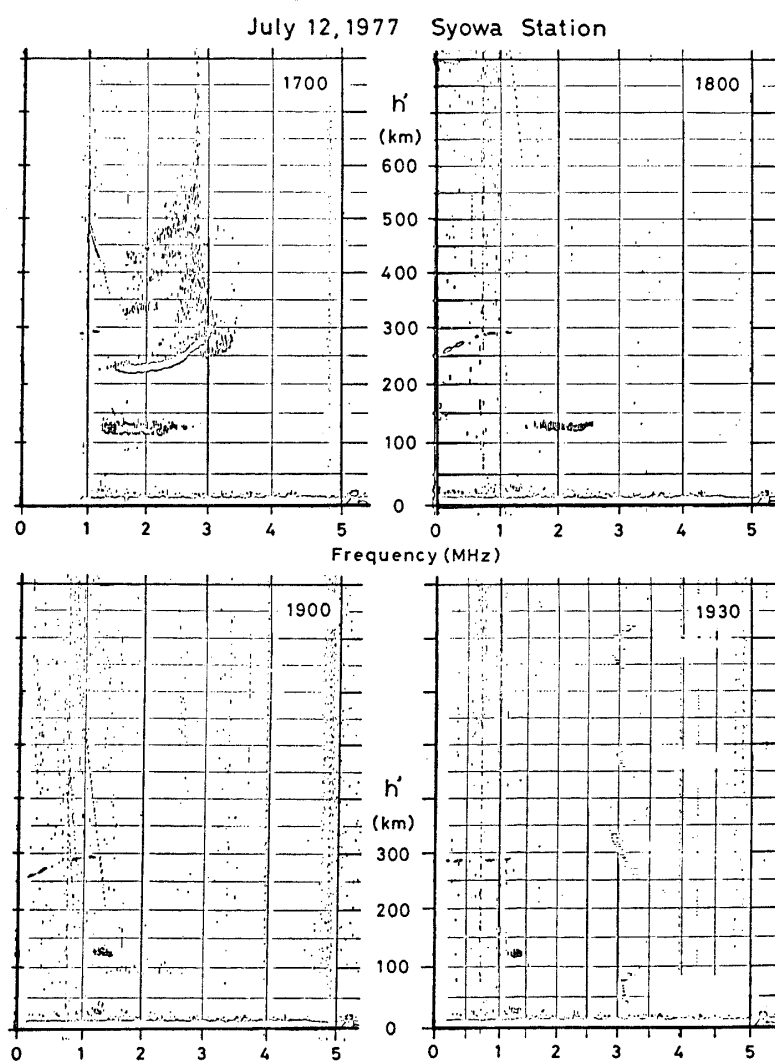


図 2 昭和基地におけるイオノグラム (1977年 7 月 12 日 17 時 00 分, 18 時 00 分, 19 時 00 分, 19 時 30 分 LT).

Fig. 2. Ionograms at Syowa Station at 17h00m(LT), 18h00m(LT), 19h00m(LT) and 19h30m(LT) on July 12, 1977.

ケットのプレセッション運動の周期を考慮して調べると、実際はもっと高い密度を示していると思われる。すなわち図 1 において、細かい点線のように推定される。そして全体的には、112–113 km から上では密度が減少している傾向がわかる。またこのときは *D* 領域の電子密度の enhancement は存在しなかった。今回観測されたプロファイルの電子密度は、過去十数機のロケット観測に比較してかなり低い値である。昭和基地のボトムサイドの電離層観測におけるロケット発射時刻前後のイオノグラム (図 2) によると、19時00分 (LT) までは電離層の反射エコーは存在しており、19時00分 (LT) においては、 E_s のトレースは 1.5 MHz であり、これは $2.8 \times 10^4/\text{cm}^3$ に相当し、また19時30分 (LT) においては、 E_s のエコーのト

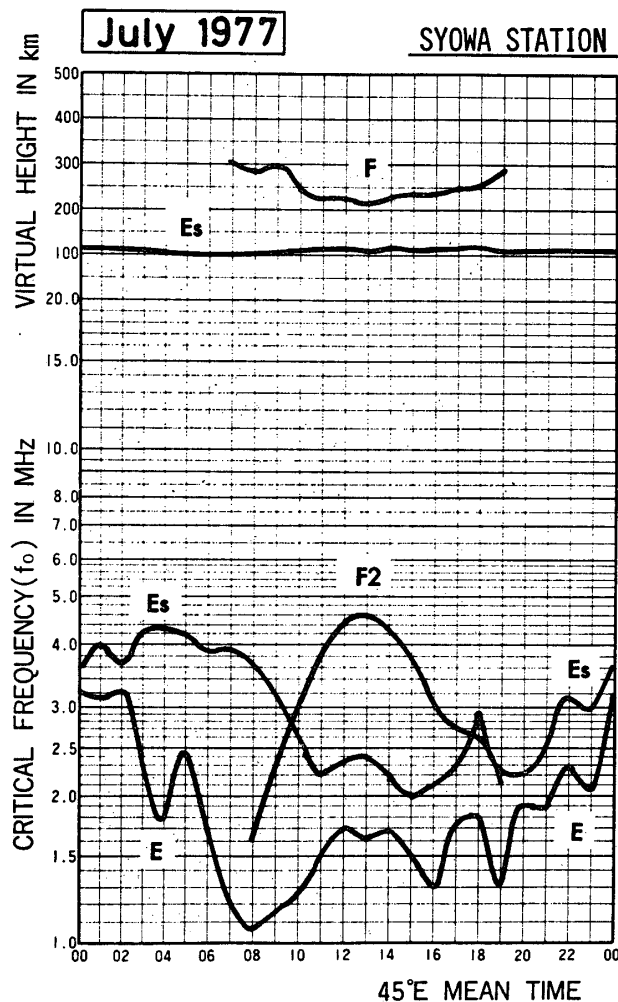


図 3 昭和基地における1977年7月の電離層データの月平均値

Fig. 3. Ionospheric data monthly median characteristics in July 1977 at Syowa Station, Antarctica.

レースは 1.3–1.4 MHz であり, これは $2.1\text{--}2.4 \times 10^4/\text{cm}^3$ に相当する. この間の時間のイオノグラムはトレースが薄く, 明瞭なデータが存在しなかった.

全体的にはロケット観測データは従来の地上観測データとよく合っているといえる.

図 3 は, 昭和基地における 1977 年 7 月の電離層データの平均特性を示したものである. この時期は午前側で E_s 層の密度が高く, 午後側特に夕刻はかなり低くなっている.

特にこの傾向は冬季に著しく, 夏季は比較的正午を中心にして午前・午後の対称性は良い (RADIO RESEARCH LABORATORIES, 1975, 1976).

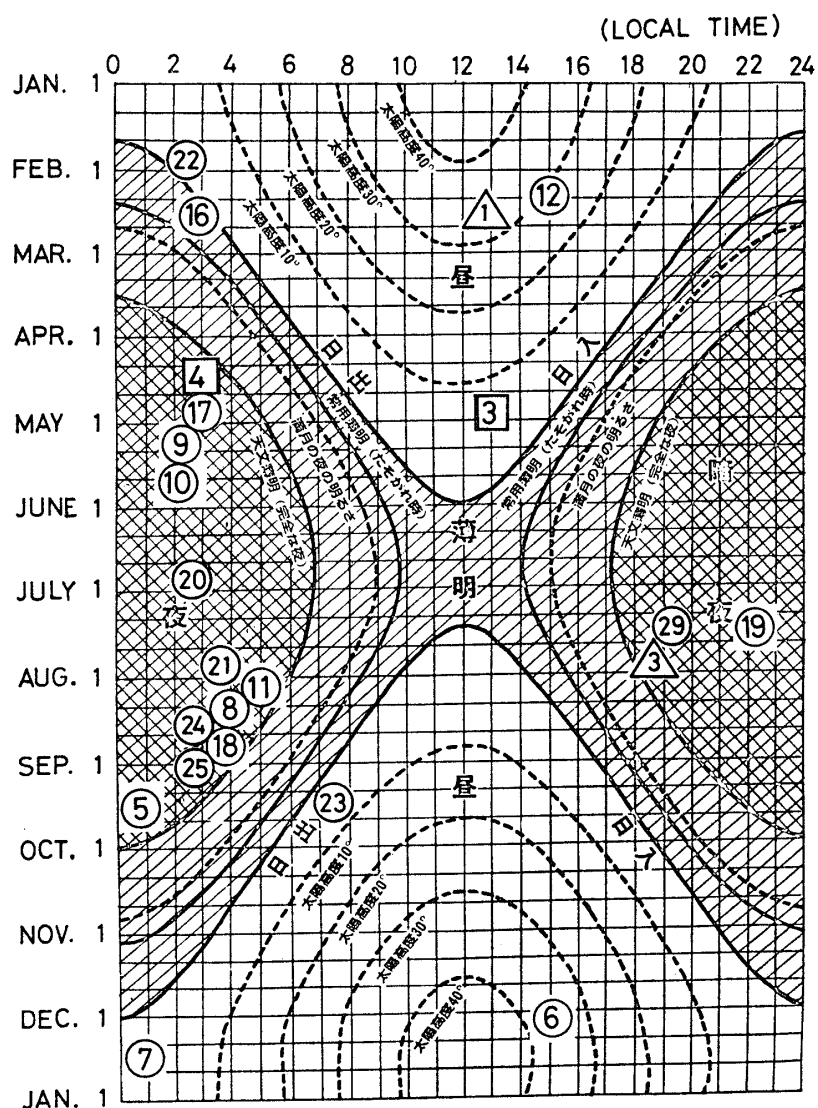


図 4 昭和基地における昼夜と観測ロケット発射日時の分布

Fig. 4. Day and night diagram at Syowa Station, Antarctica, and the distributions of the firing times of sounding rockets.

図3に示すように、夜間17-21時頃は電子密度が著しく低下することは注目値する。

図4は昭和基地の昼夜を表したものであり、数字はロケットの号機番号を示す。四角印は S-160JA 型、丸印は S-210JA 型、三角印は S-310JA 型を示す。さて S-210JA-29 号機は7月12日の19時15分 (LT) の発射で、この時刻付近での発射はきわめて少ない。このことは荷電粒子降下によるオーロラの発生は午前側に多いことを示すものである。

図5は、今まで得られた夜間プロファイル (OGAWA *et al.*, 1978) と今回の観測とを比較したものである。図5からわかる主な特徴は、

- (1) S-210JA-29 号機の場合、全体的に密度の値が低い。ただし 95 km 以下で多少密度が高い。
- (2) オーロラ粒子による E_s 層の生成は高度約 85-115 km に存在し、密度は顕著に変化する。最小値は約 $10^4/\text{cm}^3$ であり、最大値は約 $10^6/\text{cm}^3$ であることがわかる。
- (3) 高度約 120 km 以上では密度が減少し、その値は $10^3/\text{cm}^3$ のオーダーである。そしてじょう乱時における密度の増加は最大 $10^5/\text{cm}^3$ である。

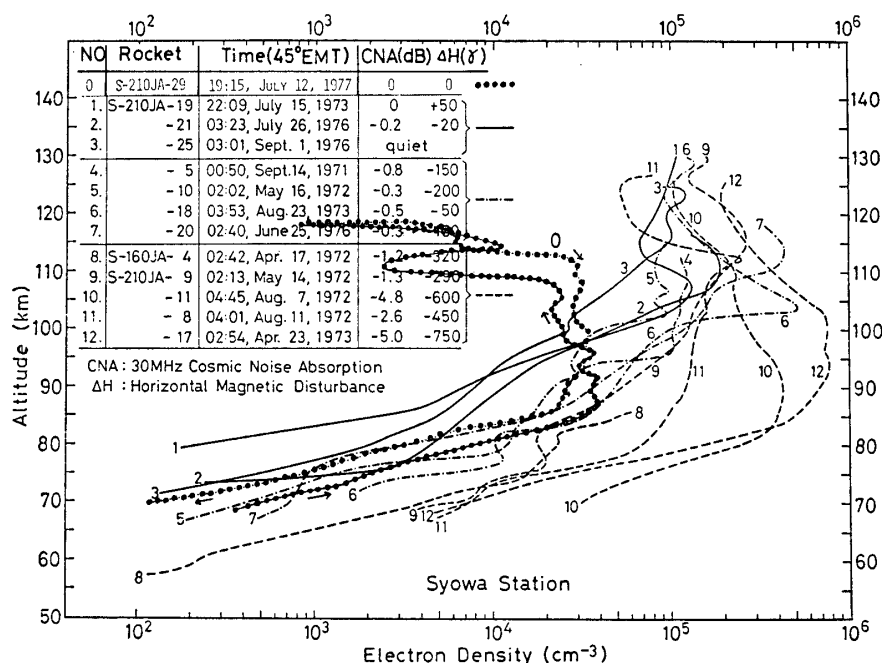


図5 昭和基地において観測された夜間電離層の電子密度高度分布の比較

Fig. 5. Nighttime electron density profiles of the polar ionosphere at Syowa Station, Antarctica.

3. 電子密度ゆらぎの観測結果

極域において高度 100 km 付近はオーロラの出現が頻発し、強いジェット電流、強い電場、電子密度の大きなゆらぎが存在する。密度ゆらぎに関して、外国では KELLEY and MOZER (1973) のロケット観測、BALSLEY and ECKLUND (1972), BALSLEY *et al.* (1973) のオーロラレーダによる観測があり、我が国でも、S-210JA-6 号機で初めて 96–115 km の範囲に電子密度の微小ゆらぎを観測した。さらに S-210JA-8, -9, -10, -16, -17, -18 号機のラングミュアプローブの電子電流に顕著なゆらぎを観測した（森他, 1974; OGAWA *et al.*, 1976）。これらのゆらぎすなわち静電ノイズの観測としては従来 0–160 Hz レンジによる測定であった。

図 6 は S-210JA-8 号機によって観測されたラングミュアプローブの電流波形である。横軸は三角波状の掃引電圧を示す。縦軸は電流を示し、また各曲線は高度による違いを示す。高

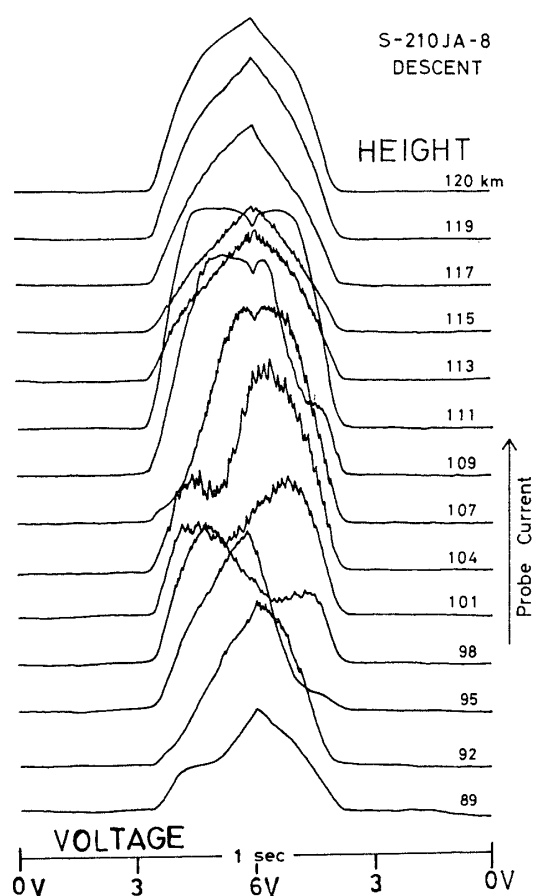


図 6 S-210JA-8 号機の下降時におけるラングミュアプローブの電流－電圧特性曲線
 Fig. 6. Current-voltage characteristic curves of Langmuir probe aboard S-210JA-8 rocket in the descending time.

度 98 km から 115 km の間に、微小のゆらぎが重畳されているのがはっきりとわかる。これが電離層プラズマに生じている irregularities である。S-210JA-25 号機では 0-1 kHz まで観測範囲をのばした (森他, 1979)。今回 S-210JA-29 号機では初めて 0-10 kHz までの測定を試みた。観測結果によると、静電ノイズのスペクトルは高度に対して著しい変化を示している。

図 7 は、ファラディカップによって観測された静電ノイズのデータを示す。上昇時高度 95-106 km, 下降時 104-112 km においてゆらぎの振幅が大きくなり、1-2 kHz にピークをもち、スペクトルは高周波側にのびているのが観測された。

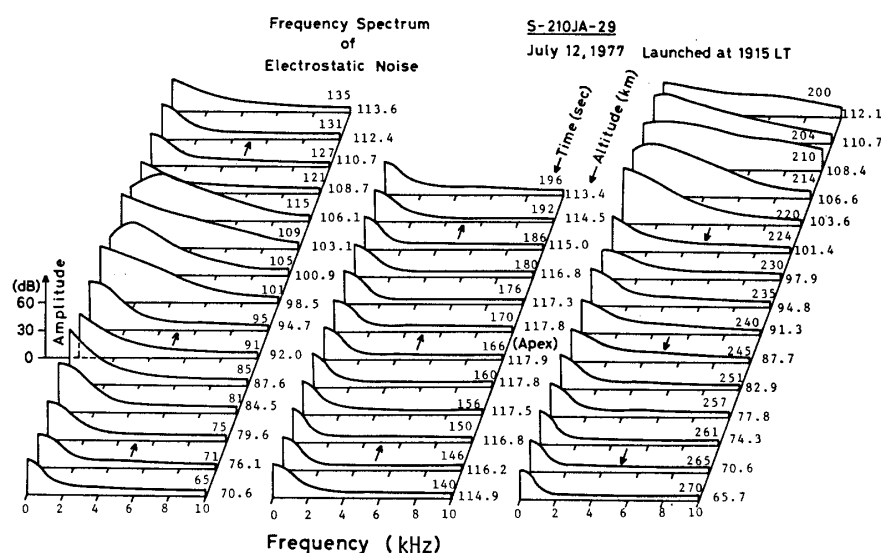


図 7 ファラディカップによる静電ノイズ・スペクトルの高度変化

Fig. 7. Records of observational data of electrostatic noise frequency spectrum by S-210JA-29 rocket.

図 8 は、 E_s 領域において卓越した静電ノイズ周波数スペクトルの増加量の高度変化を示す。すなわちプラズマが、極端に薄い低高度と高高度で見られるのは受信機のノイズ成分 (特に 0-2 kHz 成分が多い) と考えて (ここでは高度 70.6, 117.9, 65.7 km の 3 つの平均), これを観測スペクトルから差し引くと、大きな静電ノイズの観測されたピークの位置は明らかに 1-2 kHz に存在する。上昇時は小さいのまで考慮すると、高度 84.5 km, 94.7-106.1 km において、下降時は高度 103.6-112.1 km において存在する。

さて、これらの静電ノイズの成因については、 E 領域のような不完全電離磁化プラズマ中において何らかの静電場が存在すると、イオンは中性粒子との衝突によってあまり動けない

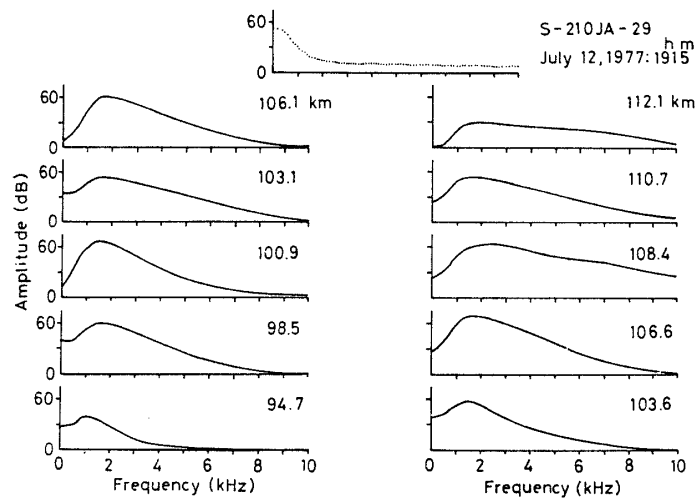


図 8 E 領域において卓越した静電ノイズ周波数スペクトルの増加量の高度変化（左側は上昇時，右側は下降時，中央上は測定系に起因する残留スペクトル特性を示す）。

Fig. 8. Increment component in electrostatic noise frequency spectrum measured in the E region (left: ascending time, right: descending time, upper center: residual noise spectrum).

が，電子は $E \times B$ ドリフトによって動く．ドリフト速度に差があることによって電流が発生すると同時に，このドリフト速度が音速を越えると 2 流体不安定によりイオン波が発生する．このイオン波の周波数は数 kHz である．電場が強いほど高周波側へのびる．この 2 流体不安定が， E 層に発生する電場の下限は約 30 mV/m である．ロケットは数百 m/s の速さであるから，この周波数 f は数十 Hz $< f <$ 数 kHz になる．

他方，磁場と直交する方向にプラズマの密度勾配が存在し，しかもそれと同じ方向に静電場が存在すると，クロスフィールド不安定により低周波のドリフト波が発生する．発生する周波数 f は，電場；数 mV/m，密度勾配； $(dn_e/dX)/n_e \sim 10^{-4}$ で数 Hz $< f <$ 数十 Hz である．

今回の観測結果からは，約 1.5 kHz にピークが存在するところから判断して，2 流体不安定による密度ゆらぎと考えることができる．ただし低周波領域では，クロスフィールド型の不安定も存在することがいえる．したがって高度の低い所では，クロスフィールド型の instability であると推定され，また高度の高い所では 2 流体型の instability が大いに卓越していると推定される．

以上は，電子密度ゆらぎの周波数スペクトルから考察されたものであるが，S-210JA-29 号機には，電場測定器（小川他，1979）および磁場測定器も同時に搭載されているので，これらのデータから静電場，電場変動成分および電流層等についての情報が得られるので，総合

的な考察は今後の課題である。

4. 結 言

S-210JA-29 号機によって、電子密度およびそのゆらぎの観測が行われた。観測された電子密度のプロファイルについては、全体的に電子密度が低いことが特徴である。静穏時におけるこの時刻（19時15分 LT）の観測は、今回が最初であり、夕刻の E_s 層の特徴が明らかになった。またロケットデータは従来の地上観測とよく合っている。

また電子密度ゆらぎのスペクトル観測結果において、1-2 kHz にピークが存在するところから、プラズマ不安定現象の数値的解析によれば、高度の高い所では2流体不安定による密度ゆらぎが存在し、高度の低い所では、低周波領域のスペクトルからクロスフィールド型の不安定性が存在すると推定される。

今後の計画として、オーロラ粒子降下に伴う AC/DC 電場発生に関連する密度ゆらぎの詳細解明のために第19次南極地域観測隊による S-310JA-7 号機（1978年3月27日22時15分 LT）のデータ解析を行う予定である。

謝 辞

本ロケット実験は第18次南極地域観測隊によって越冬中、成功裏に行われたものであり、隊員各位に敬意を表します。

電場測定データおよび電子密度ゆらぎデータについて議論していただいた京都大学理学部小川俊雄助教授、ロケット発射時のマグネットグラム、 K -index および VLF エミッションについてのデータのご支援に対して国立極地研究所の福西浩助教授、ロケット飛しょう軌跡および発射時データのご支援に対して国立極地研究所の鮎川勝助手、イオノグラムの解釈、データのご支援に対して電波研究所の大瀬正美主任研究官、田口庄次研究官に対して深甚の意を表します。

さらに、本ロケット観測計画および解析に関してご指導、ご助言いただいた京都大学木村磐根教授、東京大学国分征助教授ならびに東北大学大家寛教授に感謝の意を表します。

なお、これは国立極地研究所の共同研究プロジェクトに参加したものであり、かつ電波研究所の南極観測本部プロジェクト (J-127) の一環として行われたものである。

文 献

- BALSLEY, B. B. and ECKLUND, W. L. (1972): VHF power spectra of the radar aurora. *J. Geophys. Res.*, **77**, 4746–4760.
- BALSLEY, B. B., ECKLUND, W. L. and GREENWALD, R. A. (1973): VHF doppler spectra of radar echoes associated with a visual auroral form: Observations and implications. *J. Geophys. Res.*, **78**, 1681–1687.
- KELLEY, M. C. and MOZER, F. S. (1973): Electric field and plasma density oscillations due to the high-frequency hall current two-stream instability in the auroral *E* region. *J. Geophys. Res.*, **78**, 2214–2221.
- 森 弘隆・小川忠彦・宮崎 茂 (1974): 極域電離層 *E* 領域の電子密度ゆらぎ. 電波研究所季報, **20**, 447–457.
- 森 弘隆・小川忠彦・宮崎 茂 (1979): ロケットによる極域電離層プラズマのじょう乱の観測. 南極資料, **65**, 36–44.
- 小川俊雄・岩上直幹・鮎川 勝 (1979): 静穏時の極域電場—S-210JA-29 と B-5JA-20 による観測結果一. 第2回極域における電離圏磁気圏総合観測シンポジウム. 東京, 国立極地研究所, 11.
- OGAWA, T., MORI, H. and MIYAZAKI, S. (1976): Rocket observations of electron density irregularities in the Antarctic auroral *E* region. *J. Geophys. Res.*, **81**, 4013–4015.
- OGAWA, T., MORI, H. and MIYAZAKI, S. (1978): Electron density and temperature profiles in the Antarctic auroral ionosphere observed by sounding rockets. *J. Radio Res. Labs.*, **25**, 73–94.
- OSE, M., NISHIYAMA, N. and SAKAMOTO, J. (1978): Riometer records of 30 MHz cosmic noise at Syowa Station, Antarctica in 1977. *JARE Data Rep.*, **46** (Ionosphere), 1–82.
- RADIO RESEARCH LABORATORIES (1975): Ionospheric Data at Syowa Station (Antarctica). **25**, 1–80.
- RADIO RESEARCH LABORATORIES (1976): Ionospheric Data at Syowa Station (Antarctica). **27**, 1–80.